

Elimination des micropolluants dans les eaux usées

Essais pilotes à la station d'épuration de Lausanne

Jonas Margot



Entfernung von Mikroverunreinigungen aus dem Abwasser

Pilotversuche in der Kläranlage Lausanne

Kommunales Abwasser enthält viele organische Spurenstoffe (Mikroverunreinigungen), die in konventionellen Abwasserreinigungsanlagen (ARA) nur ungenügend entfernt werden. Um den Eintrag dieser Substanzen in die Gewässer zu reduzieren, wurden auf der ARA Vidy in Lausanne zwei weitergehende Verfahren (die Ozonung und die Adsorption an Pulveraktivkohle) über ein Jahr grosstechnisch betrieben. Beide Verfahren erwiesen sich als geeignet, den Eintrag von Mikroverunreinigungen in die Gewässer deutlich zu reduzieren. Die Studie zeigte auch, dass die beiden Verfahren grosstechnisch in ARA eingesetzt und betrieben werden können.

Elimination of micropollutants from wastewater

Pilot project at the wastewater treatment plant of Lausanne

Many organic micropollutants present in municipal wastewater are poorly removed in conventional wastewater treatment plants (WWTP). To reduce the release of these substances into surface waters, two advanced treatments, ozonation and adsorption onto powdered activated carbon, were tested on a large scale in the WWTP of Vidy in Lausanne over more than one year. Both treatments proved to be effective to reduce the release of micropollutants into the aquatic environment. These processes are feasible in terms of implementation and operation on a large scale in WWTP.

De nombreux micropolluants organiques présents dans les eaux usées sont mal éliminés dans les stations d'épuration (STEP) conventionnelles. Pour réduire l'apport de ces substances dans les eaux de surface, deux traitements avancés (par ozonation et par adsorption sur charbon actif en poudre) ont été testés à grande échelle à la STEP de Vidy (Lausanne) pendant plus d'une année. Ces deux traitements s'avèrent efficaces pour réduire l'apport de micropolluants dans les milieux aquatiques. Cette étude montre que ces procédés sont réalisables à grande échelle dans les STEP tant au niveau de l'implémentation que de l'exploitation.

1 Introduction

Plus de 30 000 substances organiques de synthèse sont couramment utilisées en Suisse [1]. Beaucoup d'entre elles, notamment des résidus de médicaments, des produits de soins corporels, des détergents, des biocides et des pesticides sont évacuées avec les eaux usées. Ces molécules, conçues pour être biologiquement actives, peuvent être toxiques pour les organismes vivants à très faibles concentrations, d'où leur appellation de «micropolluants».

De nombreuses études ont montré que ces substances ne sont qu'en partie retenues ou dégradées dans les stations d'épuration (STEP) conventionnelles et se retrouvent ainsi dans les eaux de surface [2]. Des concentra-

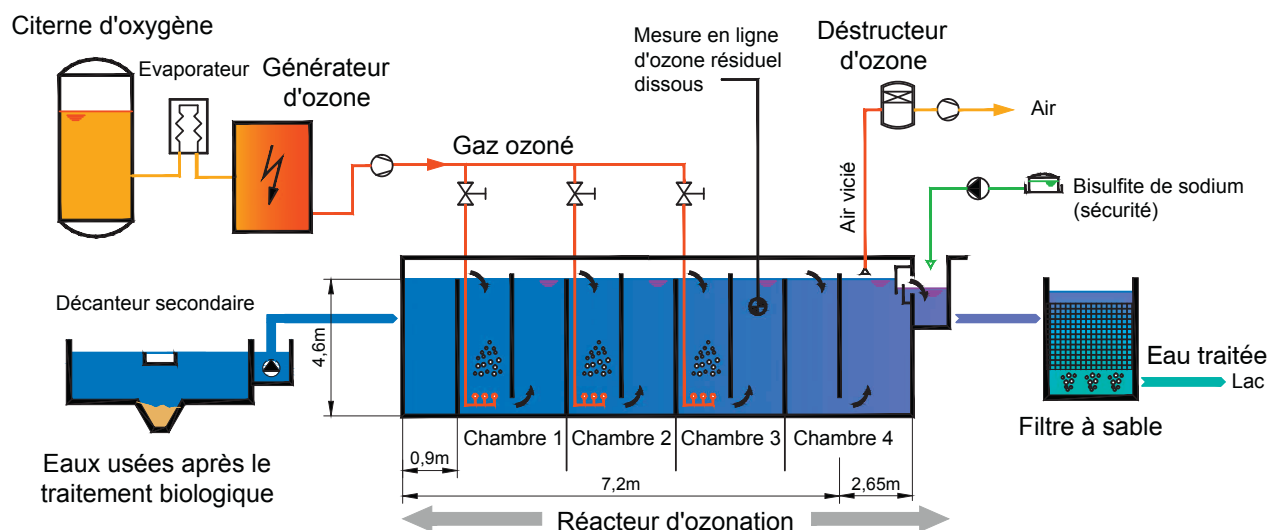


Fig. 1 Schéma de l'installation d'ozonation.

tions élevées de micropolluants ont été observées dans des petits cours d'eau récepteurs de STEP (faible dilution) [3]. Si des effets néfastes à certaines concentrations ont été observés sur les organismes aquatiques (par exemple une activité hormonale féminine chez les poissons mâles à l'aval de certaines STEP [4]), les effets à long terme sur la santé humaine ne sont pas encore connus. Les eaux de surface étant utilisées pour la consommation en eau potable, le principe de précaution doit être appliqué. Il est par conséquent nécessaire d'identifier des solutions pour réduire le rejet de micropolluants dans les eaux, soit en améliorant les procédés d'épuration existants dans les STEP, soit en ajoutant des traitements complémentaires (traitements avancés des micropolluants). Ces mesures centralisées sont à combiner avec d'autres mesures, telles que des réglementations sur l'utilisation de certaines substances problématiques, la sensibilisation de la population et des traitements à la source.

Afin d'évaluer l'efficacité de différents traitements avancés et d'identifier les conditions de fonctionnement optimales, deux procédés ont été testés en parallèle dans des

installations pilotes à la STEP de Vidy (Lausanne) en 2009–2010. Il s'agit de:

1. L'élimination des micropolluants par oxydation avec de l'ozone,
2. L'élimination des micropolluants par adsorption sur charbon actif en poudre (CAP), lequel est retenu par filtration.

Ces essais pilotes ont été réalisés par la Ville de Lausanne avec le soutien du canton de Vaud et de l'Office fédéral de l'environnement dans le cadre du projet *Stratégie Micropoll.* Cet article présente ici un résumé du rapport final [5].

2 Installations pilotes

La STEP de Vidy traite les eaux usées d'environ 220 000 équivalents-habitants (EH) avec une chaîne de traitement classique composée de prétraitements (dessablage et dégrillage à 1 cm), d'une décantation primaire, d'un traitement biologique par boues activées (âge des boues de 2 jours, sans nitrification), suivi d'une décantation secondaire. Les boues primaires et secondaires sont ensuite déshydratées puis incinérées sur site.

Les essais se sont concentrés sur les étapes prépondérantes de l'élimi-

nation des micropolluants: le traitement biologique et les traitements avancés.

2.1 Traitements biologiques

L'élimination des micropolluants organiques dans le traitement biologique est essentiellement due à deux phénomènes [6]: la *dégradation par les microorganismes* présents dans les boues et la *sorption* sur les particules ou les boues. Pour les substances étudiées, plutôt hydrophiles (polaires), la biodégradation est supposée être le processus d'élimination dominant. La probabilité qu'une substance soit dégradée augmente avec l'âge des boues (communauté bactérienne plus diversifiée, développement d'enzymes spécifiques, adaptation au substrat, etc.) [7].

Afin d'étudier les performances d'un traitement biologique plus performant que celui en place, avec un âge des boues plus élevé permettant une nitrification complète de l'ammonium, et d'avoir une eau de meilleure qualité pour les traitements avancés, un nouveau traitement biologique par *lit fluidisé* (LF) (capacité d'environ 10 000 EH) a été construit en parallèle au traitement biologique existant.

2.2 Traitement par ozonation

L'ozone est un puissant oxydant qui permet de dégrader de nombreuses substances organiques. Il réagit rapidement et de manière sélective principalement avec les doubles liaisons, les amines déprotonées et les composés aromatiques activés [8]. L'ozone, très instable, se décompose rapidement dans l'eau. Sa décom-

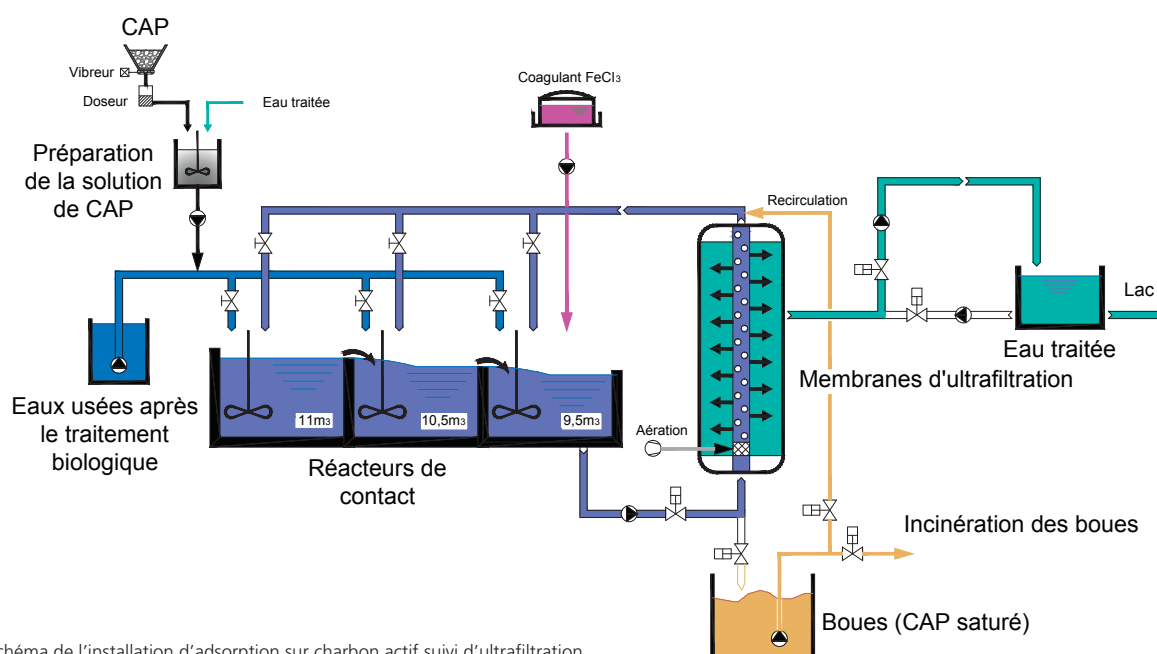


Fig. 2 Schéma de l'installation d'adsorption sur charbon actif suivi d'ultrafiltration.

position entraîne la formation du *radical hydroxyle* ($\bullet\text{OH}$), lui aussi puissant oxydant qui réagit très rapidement de manière non sélective avec la plupart des molécules organiques. L'ozone réagit non seulement avec les composés organiques, mais également avec le nitrite et d'autres composés inorganiques. Pour éviter une surconsommation d'ozone, il est donc préférable d'avoir de faibles concentrations de carbone organique dissous (COD) et de nitrite dans les eaux à traiter, ce qui peut être obtenu avec une étape de nitrification dans le traitement biologique [9].

Les doses d'ozone appliquées pour le traitement des eaux usées (1 à 10 mg O_3/l) n'entraînent qu'une oxydation partielle des substances, qui peuvent se transformer en *sous-produits biologiquement actifs*, voire même dans certains cas, plus toxiques que la substance d'origine (par exemple formation de bromate, de formaldéhyde ou de nitrosamines) [10, 11]. Ces sous-produits sont cependant généralement facilement biodégradables [12]. L'ozonation est ainsi complétée d'un traitement biologiquement actif, comme une *filtration sur sable* (FS), pour neutraliser ces sous-produits réactifs.

L'installation d'ozonation est présentée dans la figure 1 (capacité d'environ 13 000 EH). Le gaz ozoné (2–14% d'ozone, produit sur site à partir d'oxygène liquide) est injecté dans un réacteur fermé pour être mis en contact avec les eaux provenant de la biologie (temps de contact > 20 minutes). La quantité d'ozone injecté est régulée afin de maintenir une concentration d'ozone résiduel dissous

constante (0,1 mg O_3/l) à la sortie de la chambre 3.

L'ozone est un gaz comburant très irritant et très toxique. De nombreuses mesures de sécurité sont nécessaires pour protéger le personnel et réduire le risque d'incendie ou d'explosion.

2.3 Traitement par charbon actif en poudre

Le charbon actif est un carbone microporeux possédant une très grande surface spécifique (700–1800 m^2/g), lui procurant ainsi une grande capacité d'adsorption [13]. Le degré d'adsorption des micropolluants dépend du *type de charbon actif* (porosité, surface spécifique, groupes fonctionnels de surface, etc.), des *caractéristiques des micropolluants* (structure moléculaire, taille, hydrophobicité, etc.) et des *conditions d'opération* (température, compétition avec d'autres composés de la matrice, temps de contact, dose de charbon, etc.). Pour le traitement des eaux usées, le charbon actif en poudre (CAP) (granulométrie de 5 à 50 μm) est généralement préféré car sa capacité et la vitesse d'adsorption sont généralement plus élevées que pour le charbon granulaire (> 0,1 mm) [14].

L'installation de traitement par CAP est présentée dans la figure 2 (capacité d'environ 1000 EH). Le CAP est introduit dans les eaux provenant de la biologie avec un dosage constant de 10 ou 20 mg CAP/l. Après un temps de contact d'environ 40 minutes, l'eau est filtrée soit par des membranes d'ultrafiltration (UF) (taille des pores de 30 nm), soit sur un filtre à sable (FS) afin de retenir le CAP. Le temps de séjour du CAP dans le système est d'environ 2 jours. Le CAP saturé est ensuite extrait pour être incinéré avec les polluants adsorbés.

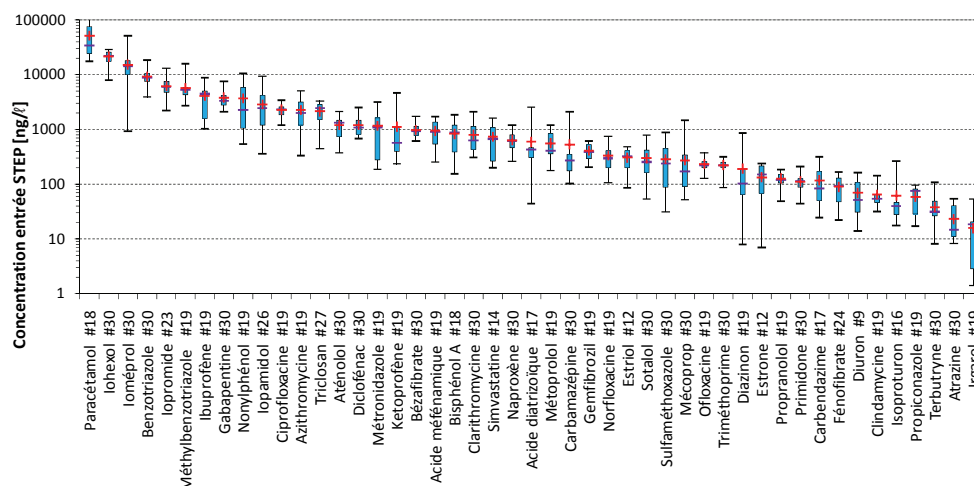
Dispersé dans l'air, le CAP est explosif. Son stockage doit donc être adapté en conséquence (mesures relatives aux zones à risque d'explosion).

3 Analyses et mesures

Pour apprécier l'efficacité des traitements vingt-quatre campagnes d'échantillonnage d'un jour et quatre grandes campagnes de sept jours consécutifs ont été réalisées, lors desquelles des échantillons composites ont été pris toutes les 15 minutes avant et après chaque traitement; l'intégralité de cette étude s'est étendue sur une durée d'une année.

Sur ces échantillons, 58 substances potentiellement problématiques (36

Fig. 3 Concentration moyenne journalière en entrée de STEP des 47 substances détectées (échelle logarithmique). Le numéro (#) indique le nombre d'analyses effectuées pour la substance. Représentation avec les quartiles 25–75% (rectangle bleu), les valeurs minimum/maximum, la médiane (–) et la moyenne (+).



médicaments, 13 biocides et pesticides, 2 inhibiteurs de corrosion et 7 disrupteurs endocriniens) ont été analysées dans la phase dissoute (extraction sur phase solide [SPE], puis quantification par chromatographie liquide à haute performance couplée à des spectromètres de masse en tandem [UPLC-MS/MS]).

Les paramètres classiques des eaux usées (DCO, DBO₅, MES, matière azotée, phosphore, pH, carbone organique dissous et total [COD/COT]) ont également été mesurés. Des analyses microbiologiques (*E. coli*, germes totaux, entérocoques, bactériophages) ont permis de quantifier la capacité de désinfection des installations.

Afin de détecter l'effet de substances non mesurées et d'évaluer la toxicité globale des effluents (effets de mélanges complexes, toxicité des produits de transformation), une large batterie de tests écotoxicologiques a été utilisée durant les 4 grandes campagnes avant et après chaque traitement:

- 16 tests *in vitro* basés sur des mécanismes cellulaires spécifiques: potentiel mutagène, effets génotoxiques, oestrogénicité et autres effets hormonaux;
- 9 tests *in vivo* sur des organismes de différents niveaux trophiques (bactéries, algues, crustacés, poissons, etc.) pour détecter la toxicité générale ou spécifique (aigüe et chronique).

4 Résultats et discussion

4.1 Concentrations initiales

Sur les 58 micropolluants analysés, 47 ont été régulièrement détectés dans les eaux usées en entrée de STEP, à des concentrations variant entre 0,001 et 100 µg/l. La concentration d'une même substance peut varier fortement suivant les jours (fig. 3) et cela indépendamment de la pluviométrie.

4.2 Traitement biologique

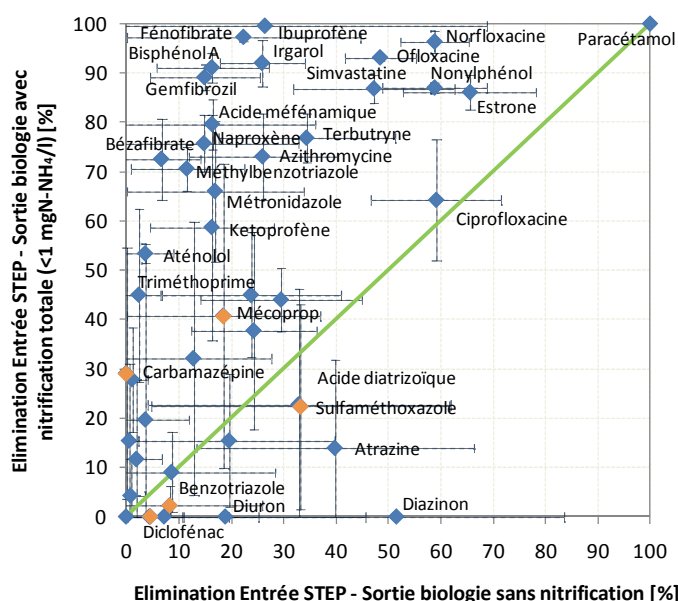
Le traitement biologique sans nitrification ne permet d'atteindre qu'une élimination moyenne d'environ 25% de l'ensemble des substances analysées. L'ajout d'une éta-

pe de *nitrification* permet d'améliorer significativement l'élimination de la plupart des micropolluants, laquelle atteint environ 50% lors d'une nitrification totale (fig. 4). Ainsi, l'élimination de certaines substances est fortement influencée par le niveau de nitrification (fig. 5). Une nitrification totale est donc souhaitable pour l'élimination des micropolluants dans les STEP sans traitements avancés. Pour atteindre 80% d'élimination (objectif du projet de modification de l'Ordonnance fédérale sur la protection des eaux pour certaines substances indicatrices [15]), un traitement complémentaire est cependant nécessaire.

4.3 Ozonation

La mise en place d'un traitement complémentaire par ozonation s'avère réalisable à grande échelle et est efficace pour réduire les concen-

Fig. 4 Comparaison de l'élimination de 45 substances dans les traitements biologiques sans nitrification ou avec nitrification totale (moyenne de respectivement 10 et 3 analyses). Points orange: 5 substances indicatrices proposées par l'OFEV.



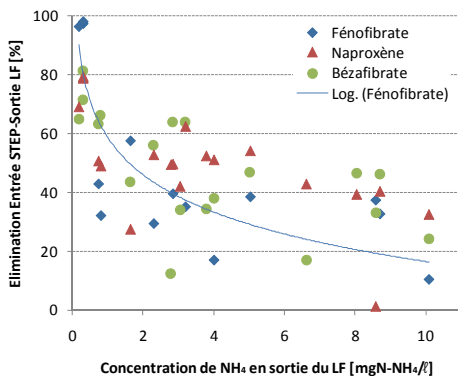


Fig. 5 Influence du niveau de nitrification (inversement proportionnel à la concentration de NH_4 en sortie du LF) sur l'élimination de trois substances entre l'entrée de la STEP et la sortie de la biologie (représentation de 19 analyses).

trations de micropolluants dans les eaux usées, la plupart des composés étant éliminés à plus de 80% pour une dose d'ozone moyenne de $5,5 \text{ mg O}_3/\ell$ (soit environ $0,9 \text{ g O}_3/\text{g COD}$). Seules quelques substances comme les produits de contraste radiographiques, certains pesticides et quelques médicaments sont moins bien éliminés pour les doses d'ozone appliquées (fig. 6a). L'ozonation permet également de réduire la toxicité des effluents dans la plupart des tests effectués, avec notamment une élimination quasi complète des effets oestrogéniques.

Aucune augmentation de toxicité clairement attribuée à la formation de sous-produits de réaction n'a été observée, malgré une légère formation de bromate (cancérigène). Une désinfection partielle de l'effluent a également pu être atteinte, l'effluent respectant les normes hygiéniques en vigueur pour les eaux de baignade dans les lacs et les cours d'eau [16, 17]. La filtration sur sable n'a pas d'effet sur l'élimination des micropolluants analysés mais permet d'améliorer significativement la qualité des eaux sur d'autres paramètres (MES, DCO, nutriments) et facilite la dégradation des sous-produits d'oxydation réactifs.

L'ozonation fonctionne efficacement sur les effluents de tous les types de biologie testés (avec ou sans nitrification). Une nitrification totale n'est donc pas indispensable pour l'éli-

mination des micropolluants par ozonation, mais permet de réduire la consommation d'ozone.

4.4 Charbon actif en poudre

Le traitement par charbon actif en poudre s'avère également efficace pour éliminer les micropolluants, la plupart des substances étant éliminées à plus de 80% avec des doses de CAP comprises entre 10 et $20 \text{ mg}/\ell$. Seules quelques substances, dont des produits de contraste radiographiques, ne sont que moyennement retenus (fig. 6b). La méthode de séparation du CAP (ultrafiltration ou filtre à sable) n'influence pas significativement l'élimination des micropolluants. La filtration sur sable permet de retenir le CAP de manière satisfaisante. La toxicité des effluents est fortement réduite dans la grande majorité des tests ef-

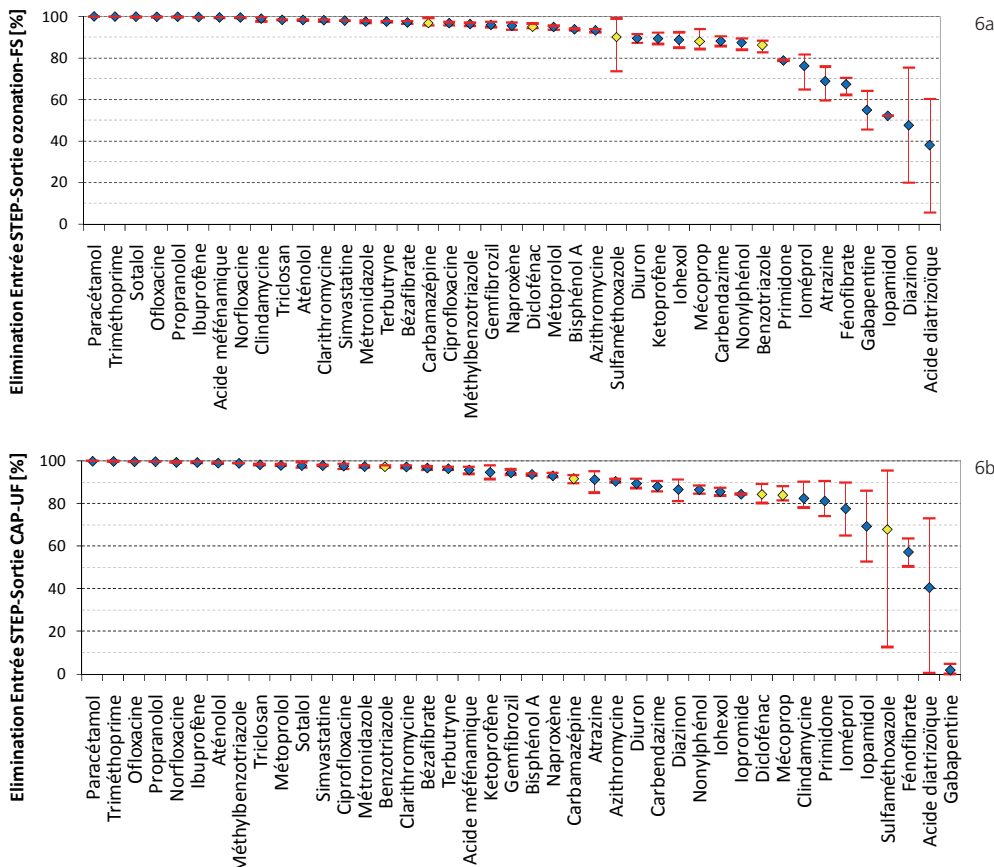


Fig. 6 Élimination des micropolluants par rapport à l'entrée de la STEP lors d'une des grandes campagnes, y compris (points jaunes) les 5 substances indicatrices proposées par l'OFEV.

(6a) Élimination par ozonation-FS: 89% d'élimination moyenne (moyenne de 3 analyses avec minimum et maximum, pour $6,7 \text{ mg O}_3/\ell$ eq. à $1,1 \text{ g O}_3/\text{g COD}$);

(6b) Élimination par traitement CAP-UF: 88% d'élimination moyenne (moyenne de 3 analyses avec minimum et maximum, pour $20 \text{ mg CAP}/\ell$).

fectués, avec notamment une élimination presque totale des effets oestrogéniques. Les eaux en sortie du traitement sont généralement non toxiques. Les membranes d'ultrafiltration permettent en outre une *désinfection totale* des eaux. Le CAP permet de diminuer d'environ 40 à 50% le COD dans l'effluent et le système de filtration permet d'améliorer de manière globale la qualité des eaux (MES, DCO, nutriments).

Trois paramètres ont été identifiés comme influençant significativement l'élimination des micropolluants:

1. La dose de charbon actif: un doublement de celle-ci (de 10 à 20 mg/l) entraînant une forte augmentation de l'élimination des micropolluants;
2. La dose de chlorure ferrique (utilisé comme coagulant pour réduire le colmatage des membranes): son effet sur l'élimination des micropolluants est clairement visible, mais n'est pas expliqué (pas observé dans d'autres essais pilotes);
3. Le type de charbon actif: des expériences en laboratoire (résultats non illustrés) montrent clairement une différence d'efficacité entre les types de CAP testés, même si celle-ci est moins visible sur les pilotes.

Les autres paramètres d'exploitation (temps de contact, concentration de CAP dans le réacteur, temps de séjour du CAP), ainsi que la qualité de l'eau en entrée du traitement n'ont qu'une faible incidence sur l'élimination des micropolluants analysés, dans les gammes testées. Si l'élimination moyenne des substances est très proche entre les traitements par ozonation ou par charbon actif, certains composés sont cependant mieux éliminés par l'un ou l'autre des traitements (fig. 7).

5 Synthèse

Sur la base des résultats obtenus lors de l'exploitation des installations pilotes, une comparaison entre les deux traitements avancés est présentée dans le *tableau 1* en fonction de critères d'exploitation. Un troisième traitement CAP-FS est présenté comme solution alternative (résultats basés sur des essais complémentaires).

Les trois technologies permettent d'atteindre l'objectif de 80% d'élimination des micropolluants. Ils s'avèrent techniquement réalisables et peuvent être exploités à grande échelle dans les STEP.

Leur mise en place dans les STEP (ozonation ou CAP avec filtre à sable) augmenterait la consommation électrique de 0,08 à 0,11 kWh/m³ traité et les coûts (exploitation + investissement) d'environ 15 à 20 centimes/m³, soit une augmentation de la consommation électrique et du coût global du traitement des eaux usées d'environ 20 à 30% comparé aux moyennes actuelles de 0,37 kWh/m³ (canton de Vaud [18]) et de 0,66 CHF/m³ (en Suisse [19]). La séparation du CAP par ultrafiltration n'est pas encore totalement maîtrisée (colmatage rapide), engendrant des coûts très élevés. Bien que l'ultrafiltration garantisse une séparation complète du CAP et permette une désinfection totale de l'effluent,

elle n'est aujourd'hui pas concurrentielle comparée aux autres procédés.

6 Conclusion

Ces essais ont confirmé que les traitements conventionnels (décantation et biologie) n'éliminent que partiellement (en moyenne < 50%) les micropolluants analysés, même avec une biologie optimisée. Les deux traitements avancés testés (ozonation et charbon actif) permettent d'éliminer à plus de 80% la plupart des substances analysées avec des doses de réactifs raisonnables. En même temps, ils réduisent la toxicité globale, comme le montrent les tests écotoxicologiques, et améliorent le rendement global de la STEP concernant les paramètres classiques (nutriments, MES, matière organique).

Cette étude a montré que l'ozonation et l'adsorption sur charbon actif sont des procédés efficaces pour le traitement avancé des micropolluants dans les eaux résiduaires urbaines. Tous deux sont réalisables et exploitables à grande échelle dans les STEP. Chaque techno-

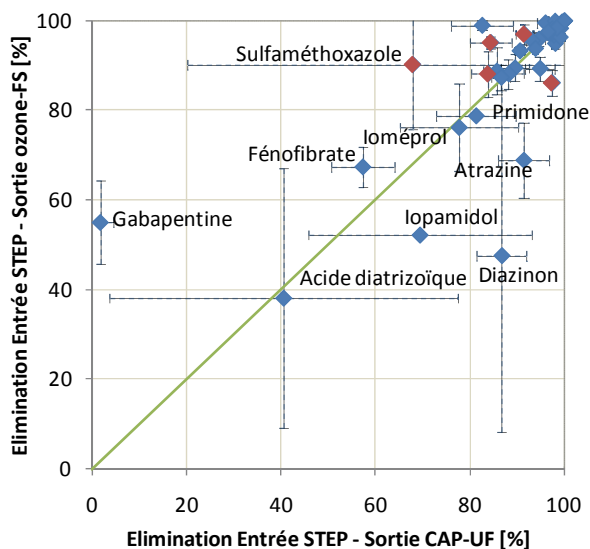


Fig. 7 Comparaison de l'ozonation-FS au traitement CAP-UF pour l'élimination de 41 substances, dont 5 substances indicatrices (rouge) lors d'une des grandes campagnes. Ozonation: 89% d'élimination moyenne (6,7 mg O₃/l); PAC-UF: 88% d'élimination moyenne (20 mg CAP/l).

Remerciements

Les auteurs remercient les nombreuses personnes ayant participé à la réussite de ce projet, notamment le Service d'assainissement de la Ville de Lausanne, le Service cantonal vaudois des Eaux, Sols et Assainissement (SESA) et l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) pour le financement des essais pilotes; ainsi que tous les services publics, les laboratoires et les bureaux privés sans qui ce projet n'aurait pas pu se réaliser. Un remerciement spécial à T. Grimplet (Ville de Lausanne) pour la réalisation des schémas, et à L. Rossi (EPFL) et C. Abegglen (Eawag) pour la relecture de ce manuscrit.

Critères	Ozone + FS	CAP + UF	CAP + FS
Mesurés/estimés lors des essais pilotes			
Élimination des micropolluants ^(a)	> 80% en moyenne (avec 5,5 mg O ₃ /l). Substances pas totalement dégradées (formation de sous-produits)	> 80% en moyenne (avec 10 à 20 mg CAP/l). Si le CAP est incinéré, les substances piégées sont totalement détruites	
Réduction de la toxicité ^(a)	Bonne (> 80% dans la plupart des tests <i>in vitro</i>)	Très bonne (> 90% dans tous les tests <i>in vitro</i>)	Non testée
Désinfection des eaux	Oui, partiellement	Oui, totalement	Non
Amélioration d'autres paramètres de qualité des eaux	Oui, grâce au filtre à sable	Réduction du COD grâce au CAP et forte amélioration globale grâce aux membranes d'ultrafiltration	Réduction du COD grâce au CAP et amélioration globale grâce au filtre à sable
Production de déchets	Non	Augmentation d'environ 10% de la production de boues dans la STEP	
Consommation électrique	0,11 kWh/m ³	0,50–0,90 kWh/m ³ ^(c)	0,08 kWh/m ³
Coûts d'exploitation ^(b)	Env. 5 à 6 centimes/m ³	Env. 30 à 50 centimes/m ³ ^(c)	Env. 6 à 8 centimes/m ³
Frais d'investissement ^(d)	Estimé à 15 centimes/m ³	Estimé entre 25 à 50 centimes/m ³	Estimé à 10 centimes/m ³
Emprise au sol	Env. 1000 m ² /(m ³ /s)	Env. 5000–7000 m ² /(m ³ /s)	Env. 1400 m ² /(m ³ /s)
Considérations générales			
Prise en compte des variations de charge	Oui, avec un dosage en fonction de l'ozone résiduel	Non, dosage seulement proportionnel au débit	
Risques pour le personnel	Formation du personnel nécessaire (substance toxique). Système de sécurité obligatoire	Peu de risques	
Risques pour l'environnement	Risque de formation de sous-produits toxiques	Technique pas adaptée en cas d'épandage des boues (pas le cas en Suisse). La production du CAP peut avoir des impacts environnementaux non négligeables.	
Type de STEP pouvant utiliser ce procédé	Besoin de personnel permanent et formé	Mise en œuvre possible dans des STEP de toutes capacités	

^(a) Traitement biologique inclus

^(b) Basé sur des prix locaux: 0,2 CHF/kWh, 2,4 CHF/kg CAP, 0,3 CHF/Nm³ O₂

^(c) Des tests complémentaires avec d'autres configurations de membrane montrent que ces valeurs pourraient être divisées par 2 ou 3

^(d) Calculés pour des installations à l'échelle pilote (capacité entre 10 et 100 l/s)

Tab. 1 Comparaison des traitements avancés des micropolluants pour différents critères d'exploitation (sur la base des résultats des essais pilotes). Les valeurs (rapportées au m³ d'eau traité) sont données à titre indicatif.

logie ayant ses avantages, le choix du procédé doit être fait au cas par cas en fonction des contraintes locales (traitements existants, place disponible, sécurité, désinfection des eaux, etc.), de la composition des eaux usées, de la qualité nécessaire dans le milieu récepteur, des impératifs économiques et des impacts environnementaux causés par ces technologies.

Bibliographie

- [1] Schärer, M. et al. (2010): Mesures complémentaires contre les micropolluants – La situation en Suisse. gwa 7/2010, p. 569–574.
- [2] Götz, C.W. et al. (2010): Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser – Kombination von Expositionen und öko-toxikologischen Effektdaten. gwa 7/2010, p. 575–585.
- [3] Gälli, R. et al. (2009): Micropolluants dans les eaux. Evaluation et réduction de la charge polluante des eaux usées urbaines. Connaissance de l'environnement n° 0917, Office fédéral de l'environnement: Berne.
- [4] PNR 50 (2008): Programme national de recherche «Perturbateurs endocriniens: importance pour les êtres humains, les animaux et les écosystèmes». Rapport de synthèse, Fond National Suisse FNS; www.nrp50.ch.
- [5] Margot, J. et al. (2011) Traitement des micropolluants dans les eaux usées – Rapport final sur les essais pilotes à la STEP de Vidy (Lausanne). Ed. Ville de Lausanne; www.lausanne.ch/micropolluants
- [6] Siegrist, H. et al. (2003): Micropolluants – Le traitement des eaux usées face à un nouveau défi? EAWAG News 57, p. 7-10
- [7] Cirja, M. et al. (2008): Factors affecting the removal of organic micropollutants from wastewater in conventional treatment plants (CTP) and membrane bioreactors (MBR). Reviews in Environmental Science and Biotechnology 7(1): p. 61–78.
- [8] Von Gunten, U. (2003): Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. Water Research 37(7): p. 1443–1467.
- [9] Abegglen, C. et al. (2010): Mikroverunreinigungen in Kläranlagen – Technische Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen. gwa 7/2010, p. 587–594.
- [10] Hollender, J. et al. (2009): Elimination of organic micropollutants in a municipal wastewater treatment plant upgraded with a full-scale post-ozonation followed by sand filtration. Environmental Science and Technology 43(20): p. 7862–7869.
- [11] Richardson, S.D. (2003): Disinfection by-products and other emerging contaminants in drinking water. TrAC – Trends in Analytical Chemistry 22(10): p. 666–684.
- [12] Hammes, F. et al. (2006): Mechanistic and kinetic evaluation of organic disinfection by-product and assimilable organic carbon (AOC) formation during the ozonation of drinking water. Water Research 40(12): p. 2275–2286.
- [13] Tchobanoglous, G. et al. (2003): Wastewater Engineering: Treatment and reuse. 4th ed., New Delhi: Metcalf & Eddy, McGraw-Hill Companies.
- [14] Nowotny, N. et al. (2007): Quantification and modeling of the elimination behavior of ecologically problematic wastewater micropollutants by adsorption on powdered and granulated activated carbon. Environmental Science and Technology 41(6): p. 2050–2055.
- [15] DETEC (2009): Déversement de substances organiques en traces dans les eaux. Rapport explicatif relatif à la modification de l'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux), OFEV www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/17613.pdf: Berne.
- [16] OFEV (1991): Recommandations pour l'évaluation de la qualité hygiénique des eaux de baignade de lacs et de rivières. Informations concernant la protection des eaux n°7.
- [17] Parlement et conseil européen (2006): Directive 2006/7/CE concernant la gestion de la qualité des eaux de baignade.
- [18] Jaquero, C.A. et al. (2010): Bilan 2009 de l'épuration vaudoise, Etat de Vaud, Service des eaux, sols et assainissement (SESA).
- [19] VSA-FES/ORED (2006): Coûts de l'assainissement – Résultats du projet pilote sur les indicateurs de l'assainissement.

Keywords

Micropolluants – station d'épuration ozonation – charbon actif

Auteurs

Jonas Margot, Ing. env. dipl. EPFL
EPFL, Laboratoire de Technologie Ecologique (ECOL)
ENAC/IE/Station 2
CH-1015 Lausanne

jonas.margot@epfl.ch
Tél. +41 (0)21 693 80 86

Anoys Magnet, Ing. env. dipl. EPFL
Ville de Lausanne
Service d'assainissement
Rue des terreux 33, CP 5032
CH-1002 Lausanne

anoys.magnet@lausanne.ch
Tél. +41 (0)21 315 79 07